引用格式：郑琼, 江丽霞, 徐玉杰, 等. 碳达峰、碳中和背景下储能技术研究进展与发展建议. 中国科学院院刊, 2022, 37(4): 529-540.
Zheng Q, Jiang L X, Xu Y J, et al. Research progress and development suggestions of energy storage technology under background of carbon peak and carbon neutrality. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2022, 37(4): 529-540. (in Chinese)

碳达峰、碳中和背景下储能技术研究进展与发展建议

郑 琼[1] 江丽霞[2] 徐玉杰[3] 高 嵩[1] 刘 涛[1] 曲 超[1] 陈海生[3*] 李先锋[1*]

1 中国科学院大连化学物理研究所 大连 116000
2 中国科学院 重大科技任务局 北京 100864
3 中国科学院工程热物理研究所 北京 100086

摘要 储能是实现碳达峰、碳中和目标的重要支撑技术之一，是平抑新能源波动、降低大规模新能源接入对电网造成冲击的重要手段。当前，全球能源资源竞争日趋激烈，我国也面临能源结构调整的重大变革。践行新时代“四个革命、一个合作”的能源战略、实现“十四五”规划和2035年远景目标，需要我国以清洁、低碳、安全、高效为驱动，构建与能源资源相适应的中国特色能源结构新体系。实现清洁能源与化石能源的互补融合是构建“清洁、低碳、安全、高效”能源新体系的关键。因此，发展大规模储能技术不仅是电力系统低碳清洁化的必要举措，同时也是抢占国际能源技术战略制高点、保障国家能源安全的有力手段。

关键词 “双碳”目标，清洁能源，大规模储能技术，多能融合

DOI 10.16418/j.issn.1000-3045.20220311001

能源利用是我国温室气体的主要来源。作为流程工业的典型高排放行业，即化工、钢铁、有色、建材工业过程的二氧化碳（CO_2）排放约占全国总排放的近 40%，是我国碳排放的主要来源。因此，CO_2 高排放行业能源利用清洁低碳化转型发展势在必行。我国实现碳达峰、碳中和（以下简称“双碳”）目标意味着必须进行颠覆性的能源革命、科技革命和经济转型。发展变革性低碳技术，通过工艺源头创新和流程再造，在典型流程工业中率先实现碳达峰、碳中和，是支撑我国“双碳”目标实现的关键。储能作为电能的载体，可有效地平抑大规模新能源发电接入电网带来的波动性，促进电力系

*通信作者
资助项目：中国科学院战略性先导科技专项（XDA21070000）
修改稿收到日期：2022年3月28日

统运行中电源和负荷的平衡，提高电网运行的安全性、经济型和灵活性；储能技术也成为构建智能电网与实现可再生能源发电的核心关键。随着碳中和成为全球共识，新能源在整个能源体系中的比重将快速增加，储能技术也迎来爆发式增长。国内外大规模新型储能项目陆续启动，储能技术呈现出液流电池、钠离子电池、锂离子电池、压缩空气储能、铅碳电池、储热技术等“百家争鸣”局面；与此同时，越来越多的企业投身储能产业，或扩产或跨界合作，储能产业呈现蓬勃发展的良好局面。

1 储能在“双碳”中的作用与地位

储能技术是解决以风、光为主的新能源系统波动性、间歇性的有效技术。未来能源系统将是以新能源为主体、多种形式能源共同构成的多元化能源系统。风力发电、光伏发电本身的波动性和间歇性决定了灵活性将是新的能源系统必不可少的组成部分。而从技术属性来看，储能正好能够满足新的能源系统对灵活性的需求。因此，通过储能技术实现可再生能源大规模接入，从而推动能源低碳转型的技术路径被业界寄予厚望。

在政策层面，国家发展和改革委员会（简称“国家发展改革委”）和国家能源局启动了对储能发展的整体规划部署，密集出台了一系列储能相关政策。2021 年 7 月，国家发展改革委、国家能源局发布《关于加快推动新型储能发展的指导意见》；相比同年 2 月 25 日发布的《推进电力源网荷储一体化和多能互补发展的指导意见》和 4 月 19 日发布的《关于 2021 年风电、光伏发电开发建设有关事项的通知（征求意见稿）》，储能的市场地位、商业模式和经济价值逐渐得到承认与明确。2021 年 10 月，中共中央、国务院先后发布了《中共中央 国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》和《国务院关于印发 2030 年前碳达峰行动方案的通知》，首次将推动新型储能发展作为加快构建清洁低碳安全高效能源体系、建设新型电力系统的重要布局和主要工作之一；并明确了到 2025 年，新型储能装机容量达到 3 000 万千瓦以上的总体目标。2021 年 12 月，国家能源局正式颁布《电力并网运行管理规定》和《电力辅助服务管理办法》文件，明确将新型储能、虚拟电厂、负荷聚集商等作为辅助服务市场的新主体；并增加了电力辅助服务新品种，完善了辅助服务分担共享新机制，疏导电力系统运行日益增加的辅助服务费用。在此政策的指引下，2021 年约有 21 个省份出台电力辅助服务相关政策。2022 年 2 月，国家发展改革委、国家能源局印发的《“十四五”新型储能发展实施方案》提出，到 2025 年，新型储能由商业化初期步入规模化发展阶段、具备大规模商业化应用条件；到 2030 年，新型储能全面市场化发展，全面支撑能源领域碳达峰目标如期实现。因此，储能是实现可再生能源规模应用和构建以新能源为主体的新型电力系统、实现“双碳”目标的关键核心技术。

2 主流储能技术发展现状

国内外在新型储能技术，包括液流电池、钠离子电池、锂离子电池、压缩空气储能等技术的基础研发和工程化方面均取得了重大进展。其中，锂离子电池技术发展最快，目前所占市场份额最大。全钒液流电池、压缩空气储能已具备大规模产业化条件；钠离子电池、铅碳电池、锌基液流电池等也已具备初步进入产业化准入条件，这些技术有望在“双碳”目标突破的过程中扮演重要角色。

2.1 液流电池储能发展现状

液流电池通过电解液内离子的价态变化实现电能存储和释放。其功率和容量可独立设计、安全性高、储能规模大、效率高、寿命长、生命周期的性价比高等特点，使其在大规模储能领域具有良好的应用前景。根据活性物质种类不同，液流电池可分为全钒液

流电池、锌基液流电池等。

2.2.1 全钒液流电池

作为长时储能优选技术之一的全钒液流电池，得益于其高安全性、长寿命、环境友好等优点，目前发展成熟度最高，商业化进程最快。2021 年 11月，微软、谷歌等 10 余家公司在《联合国气候变化框架公约》第 26 次缔约方大会（COP26）上成立国际长时储能委员会（LDES），旨在部署和加快推动可存储和释放 8 小时或更长时间的储能技术快速发展。由此可见，快速发展全钒液流电池长时储能技术的迫切性。

国外从事全钒液流电池储能技术研发和产业化的单位主要有日本的住友电工集团、英国的 Invinity 公司、德国的Fraunhofer UMSICHT、美国的西北太平洋国家实验室和 UNIEnergy Technology（UET）等企业与研究机构。2020 年住友电工集团与北海道电力有限公司签署合同将于 2022 年建成 17 MW/51 MWh 的全钒液流电池储能电站[①]。2021 年 12 月，牛津超级能源枢纽项目（ESO）进入带电调试阶段，该项目由 Invinity 公司在英国制造的 5 MWh 全钒液流电池系统与 50 MW 瓦锡兰锂离子电池结合，作为单一的储能资产运行，这是目前投运的最大的全钒液流+锂离子混合电池[②]。其中，全钒液流电池在系统投入使用时充当第一线响应，只有在所需的响应超过全钒液流电池的容量后，锂离子电池才会被调用，从而充分利用全钒液流电池长寿命、不衰减的特点，减少锂离子电池的消耗。这种混合储能方式可利用 2 种电池各自的技术优势来提高电网弹性，并创建更加智能、更加灵活的能源系统，最终将支持更多的可再生能源发电并网到英国电网中。

国内主要有中国科学院大连化学物理研究所（以下简称“大连化物所”）、大连融科储能技术发展有限公司（以下简称“大连融科”）、北京普能世纪科技有限公司（以下简称“北京普能”）、上海电气储能科技有限公司、清华大学、中国科学院沈阳金属研究所、中南大学等多家机构从事全钒液流电池的研发及产业化工作。大连化物所自 2000 年开始液流电池的研究，在液流电池关键材料、核心部件、电堆及系统设计集成、控制管理等方面都取得了国际领先的成果；已在液流电池领域获得国家授权专利 150 余项，国际专利 7 项，形成了完整的自主知识产权体系。2021 年在大连瓦房店建成了目前国内最大规模的全钒液流电池系统，即大唐国际镇海网源友好型风电场 10 MW/40 MWh 和国电投驼山网源友好型风电场 10 MW/40 MWh 全钒液流电池系统。在国家及地方政府的大力支持下，成功推进了全球最大 200 MW/800 MWh 全钒液流电池储能调峰电站国家示范项目一期工程（100 MW/400 MWh）的全面开工建设。目前，100 MW 储能系统项目已完成主体工程建设（图 1），进入单体模块调试阶段，预计 2022 年 6 月完成并网调试，这将对缓解大连市乃至辽宁省电网调峰压力、提高大连南部地区供电可靠性、加快新能源发展发挥重要作用[③]。

此外，国内多个地区正在实施或筹建全钒液流电池生产或应用示范项目，包括国家电投湖北襄阳 100 MW/500 MWh 全钒液流电池储能项目[④]；中广核新能源襄阳有限公司 100 MW/200 MWh 全钒液流电池储能

① 住友电气工业株式会社. 住友电工获得北海道电网株式会社液流电池设备订单. (2020-08-07). https://global-sei.cn/company/press/2020/08/prs078.html.

② 北极星储能网. 英国牛津超级能源枢纽项目 5 MWh 全钒液流电池储能系统进入带电调试阶段. (2021-12-20). https://chuneng.bjx.com.cn/news/20211220/1194494.shtml.

③ 韩扬眉. 100 MW 级全钒液流电池储能电站开始调试. (2022-02-17). https://news.sciencenet.cn/htmlnews/2022/2/474104.shtm.

④ 高原. 国家电投湖北 100 MW/500 MWh 全钒液流电池储能项目开工. (2021-08-31). https://chuneng.bjx.com.cn/news/20210831/1173646.shtml.



图 1 大连 100 MW/400 MWh 全钒液流电池储能调峰电站
Figure 1 Dalian 100 MW/400 MWh all-vanadium redox flow battery energy storage peak-shaving power station
（a）能量单元 - 电解液储罐；（b）功率单元 - 集装箱模块
(a) Energy system-electrolyte; (b) Power system-container module

电站项目⑤；正在建设伟力得新疆阿瓦提 7.5 MW/22.5 MWh 全钒液流储能电站⑥；北京普能将在湖北建设1 GW全钒液流储能电池生产基地⑦；河南开封、江西宜春、陕西安康、湖北郧西、甘肃张掖也都将打造全钒液流电池生产基地。

2.2.2 锌基液流电池体系

与全钒液流电池不同，以金属锌为负极活性组分的锌基液流电池体系具有储能活性物质来源广泛、价格便宜、能量密度高等优势，在分布式储能领域极具应用价值和竞争优势。目前，发展较为成熟的技术主要有锌溴液流电池和锌铁液流电池。

锌溴液流电池生产企业主要有澳大利亚的 Redflow、美国的 ZBB 和 Primus Power、韩国的乐天化学，以及中国的安徽美能和百能汇通等公司。锌铁液流电池的生产企业主要有美国的 ViZn 公司、中国的中国电建集团江西省电力建设有限公司。Redflow 公司推出的小型家用光伏发电锌溴液流电池储能系统（5 kW/10 kWh）已在澳大利亚、新西兰、美国等地成功实施[1]。2022 年大连化物所成功开发出 10 kW/30 kWh 用户侧锌溴液流电池系统（图 2）。该系统的成功开发，将进一步推动用户侧新型锌基液流电池的发展与产业化应用，对于推动锌基液流电池可持续发展具有重要意义⑧。

2.2 锂离子电池发展现状

据统计，2021 年中国储能市场中，储能锂离子电池出货量达到 32 GWh，同比增长 146%，在新型储

⑤ 北极星储能网．中广核 100 MW/200 MWh 全钒液流集中式储能电站计划 12 月份开工建设．(2021-12-06) https://chuneng.bjx.com.cn/news/20211206/1191854.shtml.

⑥ 中国储能网新闻中心．伟力得新疆阿瓦提 7.5 MW/22.5 MWh 全钒液流储能电站一期成功并网．(2020-12-25). http://www.escn.com.cn/news/show-1147667.html.

⑦ 北极星储能网．北京普能将在湖北建设 1 GW 全钒液流储能电池生产基地．(2021-03-18). https://chuneng.bjx.com.cn/news/20210318/1142534.shtml.

⑧ 储能技术研究部．发出面向用户侧的 30kWh 锌溴液流电池系统．(2022-01-17). http://www.dicp.cas.cn/xwdt/kyjz/202201/t20220117_6344516.html.



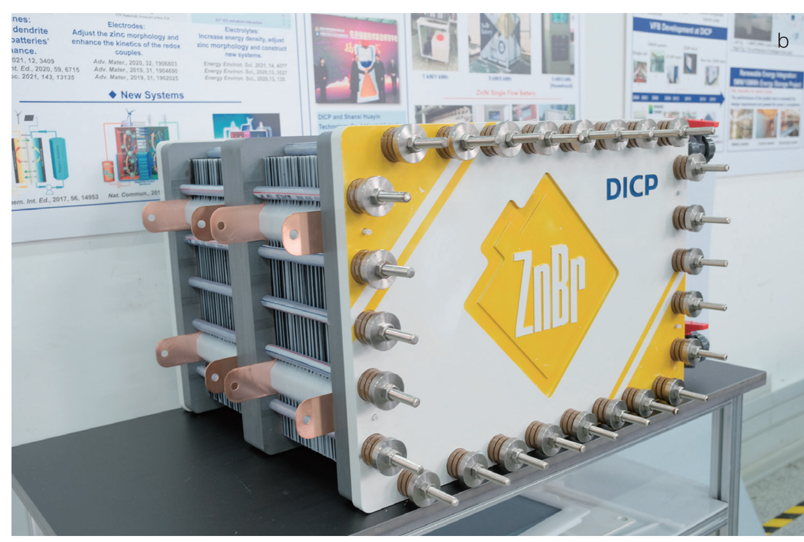


图 2 中国科学院大连化学物理研究所开发的 10 kW/30 kWh 锌溴液流电池系统

Figure 2 10 kW/30 kWh zinc-bromine flow battery system developed by Dalian Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences

（a）30 kWh 锌溴液流电池系统；（b）10 kW 锌溴液流电池电堆

(a) 30 kWh battery system; (b) 10 kW stack

能产品中占据主导地位。随着政策对新型储能支持力度加大、电力市场商业化机制建立、储能商业模式清晰、锂离子电池成本的持续下降，储能锂离子电池市场正式进入加速发展期。全球从事锂离子电池产业相关的企业超过 1 000 家，已经形成了从锂电池材料、电芯、模组到系统集成的完整产业链；特别是近年来由于电动汽车产业的带动，锂离子电池成本快速下降，从而极大地推动了其在电力储能方面的应用。全球主要的锂离子电池储能生产商来自日本（松下、三菱）、韩国（三星 SDI、LGChem）、美国（特斯拉）和中国（宁德时代新能源、比亚迪、力神等）。目前，锂离子电池在电力储能方面的应用主要包括电网调频和电网侧储能等。此外，虽然锂离子电池市场份额最大，但其在大规模应用过程中也会出现安全、可靠性等问题，急需布局相关课题重点攻关该难题。

锂离子电池具有很好的功率倍率特性，是目前储能调频市场的主流技术。锂离子电池调频性能远超火电机组，响应时间短，能够满足快速精准的调频需求。目前，在全球范围内锂离子电池调频项目主要应用在美国、英国、韩国、澳大利亚和中国。据统计，目前已经投运及在建的锂离子电池储能调频电站超过 1 000 MW。2018 年以来发布的调频辅助服务储能项目总规模已经超过 180 MW、技术路线主要为磷酸铁锂锂离子电池和三元锂离子电池。

锂离子电池在电力系统中另一大应用在电网侧。在变电站配套储能系统、通过电网的智能调度来实现削峰填谷，延缓电网的投资及提高电网主动调节能力。2016 年，美国加利福尼亚州紧急开展 100 MW 的锂离子电池储能实施计划，以应对电力短缺问题。该电池系统主要用于在白天储存加利福尼亚州光伏电站资源发出的电力；在太阳落山后，储能系统被调度将电力释放给电网。2017 年 1 月，美国特斯拉公司为南加利福尼亚州爱迪生公司的 Mira Roma 变电站建成了输出功率 20 MW、总容量 80 MWh 的锂离子储能系统，该系统成为当时全球最大的电池储能系统。随后在 2017 年 2 月，AES 公司采用三星公司的锂离子电池为圣迭戈煤气电力公司（SDG&E）在加利福尼亚州 Escondido 市部署了输出功率 30 MW、总

容量120 MWh的储能系统。该项目30 MW锂离子储能系统全部在6个月内并网投运，这不仅推动储能成了未来应对电网危机的重要解决方案，也为利用分布式储能满足当地电力容量需求提供了强有力的支撑。2021年7月，英荷壳牌石油公司宣布100 MW储能电站全面投入运营，这是欧洲目前最大规模的储能电站；其位于英国西南部威尔特郡附近，由2个装机容量均为50 MW/50 MWh的电池储能设施构成，采用磷酸铁锂/三元锂电池技术。2018年，为解决国电谏壁发电厂3台330 MW发电机组退役后带来的电力缺口问题，中国国家电网江苏省电力有限公司利用丹阳、扬中、镇江等地8处退役变电站场地，紧急建设镇江储能电站工程，充分发挥储能设备建设周期短、配置灵活、响应速度快等优势，有效缓解了供电压力。该电网侧储能项目采用“分散式布置集中式控制”方式，建设了8个储能电站项目，全部采用磷酸铁锂电池技术，规模共计101 MW/202 MWh。该储能电站于2018年7月18日正式并网投运。2020年度，江苏中天科技股份有限公司承建的全球最大的电网侧储能电站江苏二期昆山48.4 MWh储能电站投入运营（图3）；该公司承建的国家“863计划”重点研发项目——动力电池规模化梯次利用工程储能电站则是全国最大的用户侧梯次利用储能电站项目，亦于2020年末投入试运行。

2.3 钠离子电池发展现状

钠离子电池具有资源丰富、性价比高、安全性好等优点，因此有望在中低速电动车及大规模储能领域取代或部分取代锂离子电池和铅酸电池而获得广泛应用。2022年2月国家发展改革委、国家能源局正式发布《“十四五”新型储能发展实施方案》，将钠离子电池列为“十四五”新型储能核心技术装备攻关的重点方向之一，并提出钠离子电池新型储能技术试点示范要求。因此，发展资源丰富型钠离子电池技术已成为国家重大战略需求。

近10年，钠离子电池已逐步实现了从基础研究到工程应用的跨越。国内外已有超过20家企业正在进行钠离子电池产业化的相关布局，并取得了重要进展。全球主要的钠离子电池代表性企业和机构有英国FARADION公司、法国Tiamat公司、日本岸田化学公司等，以及我国的中科海钠科技有限责任公司、浙



图3　中天科技承建的48.4 MWh锂离子电池电网侧储能电站
Figure 3　48.4 MWh lithium-ion battery system developed by Zhongtian Technology Co. Ltd.

江钠创新能源有限公司、宁德时代新能源科技股份有限公司、大连化物所等[2]。不同企业采用的材料体系各有不同，按照正极材料体系，主要包括氧化物、普鲁士蓝类材料和聚阴离子型化合物3类。① 氧化物。目前，英国FRADION公司基于Ni-Mn-Ti基层状氧化物，开发出了10 Ah软包电池样品；该电池比能量达到140 Wh/kg，在80%放电深度下的循环寿命预测可超过1 000周。中科海钠科技有限责任公司依托中国科学院物理研究所已开发出基于层状氧化物的系列钠离子电池产品；该电池比能量达到140 Wh/kg以上，并已应用于低速电动车、100 kWh储能电站和1 MWh光储充智能微网系统（图4）。浙江钠创新能源有限公司制备的$Na[Ni_{1/3}Fe_{1/3}Mn_{1/3}]O_2$层状氧化物基钠离子电池软包的比能量为100—120 Wh/kg，循环1 000周后容量保持率超过92%。② 普鲁士蓝类材料。宁德时代新能源科技股份有限公司于2021年7月发布的普鲁士白基电芯，比能量达到160 Wh/kg⑨。③ 聚阴离子型化合物。法国Tiamat公司开发出的氟磷酸钒钠基电芯，可实现5 min快充，比功率可达到2—5 kW/kg，比能量为120 Wh/kg。近年来，大连化物所基于磷酸盐基聚阴离子型化合物正极，先后研制出比能量约为127 Wh/kg的磷酸钒钠基软包电池和比能量超过143 Wh/kg并可实现6 min快充的氟磷酸钒钠基软包电池，还集成出48 V/10 Ah磷酸盐基钠离子电池储能系统并作为电源成功应用于低速电动车中⑩。根据现有技术成熟度和制造规模，钠离子电池将首先从各类中低速电动车领域进入市场。随着钠离子电池技术上下游产业链的逐步完善和规模化，其应用将逐步切入到用户侧、大规模储能等各类应用领域。

2.4 压缩空气储能技术发展现状

压缩空气储能技术具有储能容量大、储能周期长、系统效率高、运行寿命长、投资小等优点，是

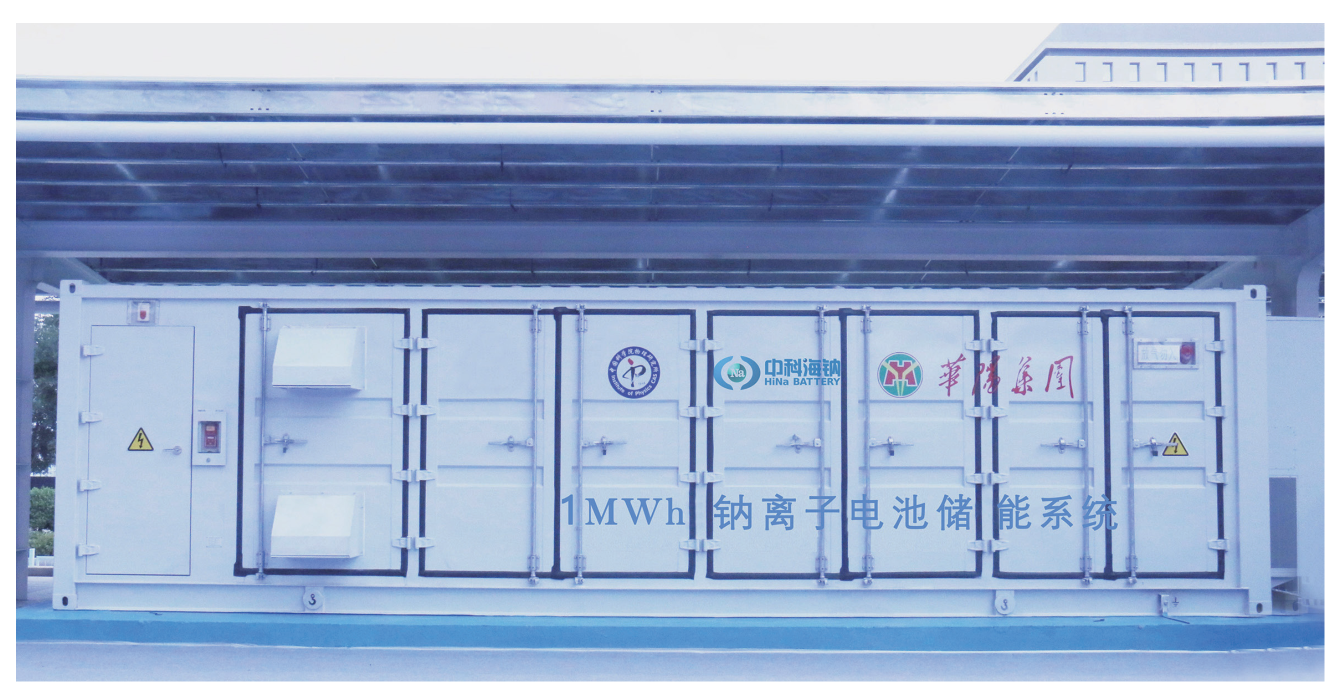


图4 1 MWh 光储充智能微网钠离子电池储能系统

Figure 4 1 MWh light storage and charging smart microgrid sodium-ion battery energy storage system

⑨ 雷科技. 告别续航难题！宁德时代钠离子电池来了：能量密度全球第一. (2021-07-29). https://baijiahao.baidu.com/s?id=1706612252451278846&wfr=spider&for=pc.

⑩ 卜叶. 新型磷酸盐基钠离子电池开展应用示范. (2022-01-01). https://news.sciencenet.cn//sbhtmlnews/2022/1/367555.shtm?id=367555.

非常适用于长时储能的大规模物理储能技术之一。近3年来，压缩空气储能技术在系统集成示范方面，国内相关科研机构与企业取得了显著的成绩。中国科学院工程热物理研究所储能研发团队于2021年9月在山东肥城建成了国际首套10 MW盐穴先进压缩空气储能商业示范电站（图5）；该电站已顺利通过发电并网验收，并正式并网发电，系统效率达60.7%⑪。位于贵州毕节的10 MW先进压缩空气储能系统于2021年10月完成并网发电⑫。在河北张家口市张北县建设国际首套100 MW先进压缩空气储能国家示范项目，已完成系统研制与示范系统集成建设，正开展系统调试，计划于2022年底投入商业运行⑬。

近几年，国外也先后布局了多项大规模压缩空气储能项目。加拿大的Hydrostor公司于2019年在加拿大安大略湖建成了1.75 MW/10 MWh的绝热压缩空气储能电站；在澳大利亚Broken Hill市规划建造200 MW/1600 MWh压缩空气储能电站，计划于2025年完成建设；在美国加利福尼亚州San Luis Obispo郡规划建设压缩空气储能电站，规模为400 MW/3200 MWh，计划于2027年完成。英国的Highview公司在英国曼彻斯特市建设50 MW/250 MWh液态空气储能系统，计划于2022年实现商业运行；该公司于2019年宣布将在美国的佛蒙特州建设50 MW/400 MWh的液态空气储能电站，至今尚未建设。清华大学团队在江苏金坛建设的盐穴压缩空气储能示范项目，已于2021年10月并网试验，项目规模为60 MW/300 MWh⑭。

2.5 其他储能技术发展现状

铅炭电池是一种在铅酸电池技术基础上发展起来



图5　山东肥城10 MW盐穴先进压缩空气储能调峰示范项目

Figure 5　Feicheng 10 MW salt cave advanced compressed air energy storage peak shaving power station

⑪ 李文，赵钢炜．国际首套盐穴先进压缩空气储能国家示范电站投产并网发电仪式在肥城市隆重举行．(2021-10-11). http://www.iet.cas.cn/xwdt/zhxw/202110/t20211011_6220995.html.

⑫ 左志涛．国际首套集气装置储气10 MW先进压缩空气储能系统成功并网．(2021-10-15). http://www.iet.cas.cn/news/zh/202110/t20211019_6225649.html.

⑬ 中储国际．重大进展：国际首套百兆瓦先进压缩空气储能国家示范项目顺利并网．(2022-01-01). https://baijiahao.baidu.com/s?id=1720681754062230221.

⑭ 弓洁．重磅！金坛盐穴压缩空气储能国家试验示范项目并网试验成功．(2021-09-30). https://m.thepaper.cn/baijiahao_14737599.

新型储能技术，具有储能成本低廉和安全性高等突出优点。国际上如先进铅酸电池联盟（ALABC）、澳大利亚联邦科学及工业研究组织、美国桑迪亚国家实验室等，国内如大连化物所、中国人民解放军防化研究院、南都电源动力股份有限公司等开展相关研究。目前，国内外已实施了多个MW级以上的风电及光伏电站用铅炭电池储能系统的应用示范⑮。

热物理储能技术主要包括显热储热、相变储热，是获得了大规模应用的储能技术，世界装机总量超过4 GW。其中，太阳能热发电中的熔盐储热装机超过3.5 GW。

飞轮储能技术方面，美国处于领先地位，其开发出20 MW/5 MWh飞轮储能调频电站运行良好。当前，我国仅建成MW级飞轮储能阵列工程示范应用系统，较国外发展相对偏慢。

3 储能发展存在的问题及挑战

我国新型储能行业整体处于由研发、示范向商业化初期的过渡阶段，在技术装备研发、示范项目建设、商业模式探索、政策体系构建等方面取得了实质性进展；市场应用规模稳步扩大，对能源转型的支撑作用初步显现。但是，其发展过程中仍面临着从技术、应用到市场的不同层面的问题和挑战。

（1）基础性、原创性、突破性创新不足。目前，储能领域中我国具有“领跑”意义的先进技术还不多，储能转化的相关机理、技术及系统的研究还不足够成熟，对储能的基础性和关键共性技术研究不足，尤其在设计软件、设计标准与理念方面缺少话语权。

（2）风电、光伏等新能源并网消纳压力巨大，制约其大规模推广。发电是当前新能源的最主要利用方式，但新能源大规模并网，将对现有电力系统的运行产生重大影响：① 对大电网安全稳定运行带来巨大压力。主要由于新能源涉网性能标准偏低，频率、电压耐受能力有限，新能源大规模并网可能导致系统转动惯量不足所致。同时，电力系统电子化趋势的发展将引发次同步谐波与次同步振荡，给高渗透率的分布式电源带来运行管理问题。② 给系统供给侧稳定性带来隐患。风电、光伏发电的间歇性和反调峰特性明显，电力电量时空平衡困难，加之系统调峰能力不足，给电力系统供给侧的稳定性带来隐患。③ 易引发电力供给与需求失衡。目前，新能源并网配套的输电网规划建设滞后，电网建设和新能源电力输送需求尚未达到同步，电力无法及时被输送到需求端，进而引发电力供给与需求失衡。

（3）大规模储能技术推广受电力系统市场机制不完善等方面限制。近年来，我国储能技术取得长足的发展，在电力系统发、输、配、用等环节的应用规模也不断壮大。储能技术自主化程度不断提高，部分技术如液流电池技术等处于国际领先地位。尽管如此，仍存在储能市场主体地位不明晰、市场机制不完善导致储能价值收益难以得到合理补偿等问题。我国现阶段还远未建立起成熟的竞争性电力市场运行机制，很难合理地核定出各类电力辅助服务的价格，从而造成储能系统价值和收益难以实现对接。因此，从简化电力市场设计的复杂程度、有利于电力市场化改革顺利推进的角度出发，宜针对电化学储能技术的系统性效用或社会价值制定更为合理的运行机制和政策保证。

4 推进储能产业发展实施的建议

为全面支撑能源领域“双碳”目标如期实现，特对储能发展提出4点建议。

（1）加大支持具备自主知识产权的储能技术的发展和应用推广。加快制定和完善针对储能技术的支持

⑮ 王尔德. 南都电源布局铅炭储能 筹建能源互联网运营公司. (2016-06-22). https://m.21jingji.com/article/20160622/herald/07fd5ba763f8db2073d75f8932420819.html.

和激励政策，推进具有自主知识产权的储能技术的快速发展；进一步提升储能系统可为电力系统提供灵活调节能力的重要作用地位；开展多种储能技术集成的应用示范，明确不同储能技术对于发、输、配、用不同环节均可为电力系统提供公共服务的基本属性，结合不同场景实际需求合理布局，加快多元化储能技术示范应用及市场化推广。

（2）明确储能在独立市场中的主体地位，完善市场运行机制，建立合理的储能长效补偿和补偿监管机制。赋予新能源发电侧配套储能系统参与电力辅助服务平等的市场主体地位；建立可持续的长效储能行业市场运行机制，降低市场的不确定性；建立合理的电价补偿机制，结合电力体制改革，建立行之有效的补偿机制细则和具体的产业扶持政策；鼓励多元化的投资及交易方式，提高性价比，促进储能产业的可持续发展，形成大规模储能技术良性发展的态势，助力我国电力系统的转型升级。

（3）加强下一代储能技术的基础创新研究，加强储能领域核心技术的知识产权布局，提高储能技术在国际上的竞争力。目前，还没有任何一项储能技术能够完全胜任各种应用领域的要求。因此，在重点推动现有储能技术产业化的同时，鼓励和支持新型变革性储能技术开发，特别是低成本、长寿命、高安全、环境友好的长时储能技术。进一步加大对储能技术基础研究的投入，鼓励原始创新，掌握自主知识产权。建议科学技术部、国家自然科学基金委员会等部门设立专项、加大科技投入，支持变革性储能技术研究开发，以降低储能关键核心技术的成本，提高储能技术的性价比。

（4）建设国家级储能技术创新平台，引领储能技术快速发展，抢占储能技术发展制高点。汇集国内外科研机构、高校、企业等的创新资源，建立国家级储能技术创新平台。这对加快储能技术的成果转化，占据未来储能科学技术制高点并形成集群优势，引领并带动我国储能产业的发展具有重要的意义。通过国家级储能技术创新平台，开展相关储能技术的工程化应用研究，突破共性关键技术和产业前沿技术；坚持“产、学、研、用”的创新合作机制，快速实现技术转移和成果转化，推动储能产业的发展。

参考文献

1 张华民, 液流电池储能技术及应用. 北京: 科学出版社, 2022.

Zhang H M. Flow battery energy storage technology and application. Beijing: Science Press, 2022. (in Chinese)

2 容晓晖, 陆雅翔, 戚兴国, 等. 钠离子电池: 从基础研究到工程化探索. 储能科学与技术, 2020, 9(2): 515-522.

Rong X H, Lu Y X, Qi X G, et al. Na-ion batteries: From fundamental research to engineering exploration. Energy Storage Science and Technology, 2020, 9(2): 515-522. (in Chinese)

Research Progress and Development Suggestions of Energy Storage Technology under Background of Carbon Peak and Carbon Neutrality

ZHENG Qiong[1] JIANG Lixia[2] XU Yujie[3] GAO Song[1] LIU Tao[1] QU Chao[1] CHEN Haisheng[3*] LI Xianfeng[1*]

（1 Dalian Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Dalian 116000, China;

2 Bureau of Major R&D Programs, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100864, China;

3 Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100086, China ）

Abstract Energy storage is one of the important supporting technologies to achieve the “dual carbon” goals, and it is an important means to stabilize renewable energy fluctuations and reduce the impact of large-scale new energy access on the power grid. At present, the competition of global energy resources is becoming increasingly fierce, and China is also facing significant changes in the adjustment of energy structure. To implement the energy strategy of “four revolutions and one cooperation” in the new era, and to realize the “14th Five-Year Plan” as well as the “Long-range Objectives Through the Year 2035”, China needs to build a new system of energy structure with Chinese characteristics, driven by “clean, low-carbon, safe and efficient” energy resources. Achieving the complementary integration of clean energy and fossil energy is the key to building a new “clean, low-carbon, safe and efficient” energy system. The development of large-scale energy storage technology is not only a necessary measure for the low-carbon and clean power system, but also a powerful means to seize the strategic commanding heights of the international energy technology and ensure national energy security.

Keywords “dual carbon” goals, clean energy, large-scale energy storage technology, multi-energy integration



郑 琼 中国科学院大连化学物理研究所储能技术研究部研究组组长、副研究员。国际电工委员会液流电池标准化联合工作组（IEC/TC21/JWG7）技术专家和国家能源行业液流电池标委会（NEA/TC23）委员。中国科学院青年创新促进会会员。长期以来从事二次电池包括钠离子电池、宽温区锂离子电池、液流电池等的基础与应用研究，以及标准化工作。E-mail: zhengqiong@dicp.ac.cn

ZHENG Qiong Head of the research group of Energy Storage Technology Research Department of Dalian Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences (CAS), technical expert of the International Electrotechnical Commission Flow Battery Standardization Joint Working Group (IEC/TC21/JWG7), member of the National Energy Industry Flow Battery Standardization Committee (NEA/TC23), and member of the Youth Innovation Promotion Association of CAS. For a long time, Dr. Zheng has been engaged in basic and applied research, and standardization of secondary batteries including sodium-ion batteries, lithium-ion batteries with wide temperature range, and flow batteries. E-mail: zhengqiong@dicp.ac.cn



陈海生 中国科学院工程热物理研究所研究员，国家能源大规模物理储能研发中心主任。主要从事物理储能技术的研究工作，在压缩空气储能、蓄冷蓄热、新型抽水蓄能等方面取得重要成果；已发表论文400余篇，专利200余项，获省部级一等奖4项等。E-mail: chen_hs@iet.cm

CHEN Haisheng Professor at Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences (CAS), and Director of National Energy Large Scale Physical Energy Storage Center approved by National Energy Administration. Dr. Chen’s research area is large scale physical energy storage technologies. He has made important achievements in compressed air energy storage, cold and heat storage, new pumped-hydro storage, etc. He has published more than 400 papers, more than 200 patents, and won 4 provincial and ministerial first prizes. E-mail: chen_hs@iet.cm

*Corresponding author



李先锋　中国科学院大连化学物理研究所副所长、储能技术研究部部长、研究员、博士生导师。国家杰出青年科学基金获得者，张大煜优秀学者，科学技术部中青年科技创新人才，中国科学院卓越青年科学家、辽宁省兴辽计划“科技创新领军人才”，享受国务院政府特殊津贴。长期从事电化学储能技术特别是液流电池储能技术的基础研究和产业化开发工作。E-mail: lixianfeng@dicp.ac.cn

LI Xianfeng　Researcher, Doctoral Tutor, and Deputy Director of the Dalian Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences (CAS), and Director of the Energy Storage Technology Research Department. Dr. Li is a winner of the National Science Fund for Distinguished Young Scholars, Zhang Dayu Outstanding Scholar, Young and Middle-aged Scientific and Technological Innovation Talents of the Ministry of Science and Technology, Outstanding Young Scientists of CAS and “Leading Talents in Science and Technology Innovation” of Revitalizing Liaoning Program, Province. He enjoys the special government allowance of the State Council. He has been engaged in basic research and industrialization of electrochemical energy storage batteries, especially the flow batteries. E-mail: lixianfeng@dicp.ac.cn

■责任编辑：岳凌生